

**УДК 621.391**

***А.С. ЕРЕМЕНКО***, канд. техн. наук, с.н.с., ХНУРЭ, Харьков

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПОТОКОВОЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ПОСРЕДСТВОМ ПРОТОКОЛА TCP**

В статті аналізується функціонування протоколу TCP при потоковій передачі даних. Проведено порівняльний аналіз протоколів TCP та UDP при передачі відео та експериментальні дослідження продуктивності TCP при прямій потоковій передачі.

Ключові слова: потокова передача, мультимедіа, TCP, продуктивність.

In this article functioning of TCP protocol streaming is analyzed. The comparative analysis of TCP and UDP protocols for streaming video and experimental researches of the productivity of live streaming using TCP are carried out.

Keywords: streaming, multimedia, TCP, productivity.

В статье анализируется функционирование протокола TCP при потоковой передаче данных. Проведен сравнительный анализ протоколов TCP и UDP при передаче видео и экспериментальные исследования производительности TCP при прямой потоковой передаче.

Ключевые слова: потоковая передача, мультимедиа, TCP, производительность.

### **1. Введение**

Потоковый режим передачи данных с гарантированной доставкой данных является востребованным на сегодняшний день вследствие широкого распространения коммерческих мультимедийных порталов и приложений (например, Real Media, Windows Media, просмотр видео контента YouTube и др.), что обуславливает необходимость в специальных сетевых протоколах, ориентированных на соединение [1], [2], [3]. Протокол управления передачей TCP (Transmission Control Protocol), наиболее распространенный транспортный протокол такого типа, был условно принят не удовлетворительным для потоковой передачи данных. Такое решение было принято, поскольку TCP использует механизмы экспоненциального отката и повторных передач сегментов по тайм-ауту, которые сопровождаются увеличением задержек «из конца в конец», тем самым нарушая временные требования для передачи мультимедиа. Вследствие этих ограничений исследования последнего десятилетия были сфокусированы на разработке ориентированных на UDP (User Datagram Protocol) протоколов, поддерживающих потоковую передачу данных, а также предоставляющих механизмы TCP-толерантности и восстановления потерь [4], [5]. Но, несмотря на общепринятую точку зрения о непригодности TCP для потоковой передачи данных, этот протокол постепенно набирает популярность в мультимедийных системах.

Главным преимуществом потоковой передачи данных по протоколу TCP является TCP-толерантность [6], под которой понимается, что рассматриваемый

поток в условиях перегрузки будет себя проявлять, как поток, созданный модулем TCP, который подвержен уведомлениям о перегрузке и в установившемся режиме использует не больше пропускной способности, чем стандартный TCP-поток, функционирующий в таких же условиях (характеризация на основе скорости потерь, времени кругового обращения, размера максимальной единицы передачи и т.д.). Сравнительный анализ достоинств и недостатков потоковой передачи данных посредством протоколов транспортного уровня TCP и UDP представлен в табл. 1.

Таблица 1 Достоинства и недостатки потоковой передачи данных в рамках протоколов TCP и UDP

Протокол	Достоинства	Недостатки
TCP	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. TCP-толерантность.</li> <li>2. Надежная передача освобождает от необходимости реализации механизмов восстановления потерь на более высоких уровнях. Повторно передаются только потерянные сегменты.</li> <li>3. Введение механизмов буферизации минимизирует отрицательное влияние на производительность соединения TCP механизмов надежной передачи сегментов данных (потоковая передача с запоминанием).</li> <li>4. Реагирование на сетевую ситуацию.</li> <li>5. Поточковый контент TCP не задерживается при передаче межсетевыми экранами.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Механизмы обеспечения надежной передачи обуславливают появление запоздавших сегментов.</li> <li>2. Пульсации скорости передачи сегментов при реагировании модуля TCP отправителя на сетевую ситуацию.</li> </ol>
UDP	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Относительно постоянная скорость передачи данных.</li> <li>2. Отсутствие механизмов надежной доставки данных уменьшает вероятность появления значительных задержек, тогда как незначительные потери не влияют на качество воспроизведение медиаконтента.</li> <li>3. Возможность обеспечения реагирования на сетевые перегрузки.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Широкополосные видео потоки UDP не всегда толерантны по отношению к потокам TCP, и вследствие отсутствия механизмов контроля пропускной способности могут усугублять перегрузки в сети.</li> <li>2. Реагирование на перегрузки сети осуществляется прикладным уровнем, при этом значительно снижается скорость передачи медиаконтента.</li> <li>3. Необходимость разработки дополнительных подходов к управлению очередями пакетов на маршрутизаторах, а также обнаружению не реагирующих на сетевую ситуацию потоков.</li> </ol>

Проведенный анализ показывает, что необходимы исследования в направлении достижения достаточной производительности соединения TCP при передаче потоковых данных.

## 2. Модель производительности соединения TCP при потоковой передаче данных

В [4] предлагается базовая схема потокового TCP, аналогичная потоковой передаче посредством HTTP (Hypertext Transfer Protocol – протокол передачи гипертекста), и далее именуемая как прямая TCP-потоковая передача, а также марковская модель (цепь Маркова с дискретным временем) для прямого потокового TCP и с запоминанием данных. Для упрощения модели подразумевается, что передается поток видео, однако рассматриваемый подход может быть обобщен и для потоковой передачи другого вида контента реального времени.

Постановка задачи (рис. 1). Предположим, что клиент отправляет запрос на загрузку видеоконтента серверу. В соответствии с этим запросом сервер путем потоковой передачи данных по TCP отправляет видеоконтент клиенту. Клиент допускает начальную задержку порядка нескольких секунд, что является распространенным в практике передачи потоковых данных. Все сегменты, прибывающие ранее соответствующего времени воспроизведения, сохраняются в локальном буфере модуля TCP клиента. Этот локальный буфер предполагается достаточно большим в связи с тем, чтобы не возникало потерь сегментов на стороне клиента вследствие переполнения буфера.

Различные исследования [4], [5] показали, что потоковое видео в Интернете имеет, как правило, постоянную скорость передачи CBR (Constant Bit Rate). Учитывая это, в модели предполагается постоянная скорость воспроизведения  $\mu$  сегментов в секунду, и на стороне клиента воспроизведение подразумевается непрерывным. Также для упрощения модели считаем, что все сегменты имеют одинаковый размер. Сегмент, прибывающий позже соответствующего времени воспроизведения, считается запоздавшим сегментом. Такие сегменты являются причиной сбоев при воспроизведении данных, вследствие чего доля запоздавших сегментов (или вероятность того, что сегмент не прибудет вовремя) используется как метрика производительности соединения TCP при потоковой передаче данных.

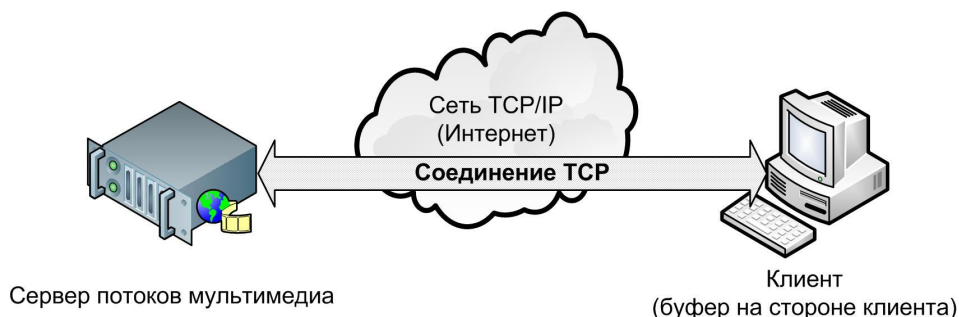


Рис. 1 Клиент-серверная архитектура соединения TCP при потоковой передаче данных (сервер передает потоковое видео клиенту посредством протокола TCP, на стороне клиента сегменты, прибывающие ранее времени проигрывания, запоминаются в буфере)

Рассмотрению предлагаются два типа потоковой передачи данных: прямая потоковая передача и с запоминанием медиа. В первом случае сервер генерирует видеоконтент в режиме реального времени и готов к передаче контента сразу же после его генерации. При потоковой передаче с запоминанием сервер передает видео так быстро, как позволяет текущая производительность ТСП с тем, чтобы максимально утилизировать доступную пропускную способность сети.

Рассмотрим марковскую цепь с дискретным временем для прямой потоковой передачи и с запоминанием медиа. Каждый момент времени соответствует длине раунда, равной времени кругового обращения  $RTT$  (Round-Trip Time) секунд. При этом при моделировании функционирования соединения ТСП в фазе предотвращения перегрузки, согласно [6], раунд начинается с передачи  $W$  сегментов, где  $W$  есть текущее значение окна перегрузки ТСП. Таким образом, в случае отправления  $W$  сегментов, новые сегменты не будут посылаться до тех пор, пока не будет получено подтверждение получения хотя бы одного из отправленных сегментов. Получение этого подтверждения сигнализирует об окончании текущего раунда и начале следующего. В этом случае длительность раунда равна времени кругового обращения  $RTT$ .

Далее длина передаваемого медиаконтента принимается равной  $L$  раундов. Скорость воспроизведения видео составляет  $\mu RTT$  сегментов за раунд.

Пусть  $f$  соответствует доле запоздавших сегментов в течение воспроизведения видео, а  $N_i$  – количеству ранних сегментов в  $i$ -ом раунде. Отрицательное значение  $N_i$  означает, что сегмент прибывает после момента воспроизведения. Принимаем  $N_i^l$  как количество запоздавших сегментов в  $i$ -том раунде. Тогда  $N_i^l \in \{0, 1, \dots, \mu RTT\}$ , причем  $N_i^l = 0$  в том случае, если в  $i$ -том раунде нет запоздавших сегментов. Пусть  $M[N_i^l]$  – среднее количество запоздавших сегментов в  $i$ -том раунде, тогда, согласно [4], долю запоздавших сегментов можно определить следующим образом:

$$f = \frac{\sum_{i=1}^L M[N_i^l]}{\mu RTT L}, \quad (1)$$

где числитель и знаменатель равны соответственно среднему значению запоздавших сегментов в течение всего времени воспроизведения и общему количеству сегментов передаваемого медиа. Далее  $M[N_i^l]$

$$M[N_i^l] = \sum_{k=1}^{\mu RTT} k P(N_i^l = k), \quad (2)$$

где  $P(N_i^l = k)$  – вероятность  $k$  запоздавших сегментов в  $i$ -том раунде.

### 3. Модель прямой потоковой передачи

Модуль ТСП сервера генерирует сегменты, которые затем размещаются в буфере на стороне клиента. Далее сегменты перемещаются из буфера через время  $\tau$  с постоянной скоростью  $\mu RTT$  сегментов в раунд. Для удобства модели подразумевается, что сегменты, пропустившие свое время воспроизведения, удаляются из буфера. Таким образом, только ранние сегменты хранятся в буфере.

Количество сегментов в буфере никогда не превышает значение  $N_{\max} = \mu\tau$ , вследствие чего модуль ТСП сервера перестает продуцировать сегменты, когда в буфере находится указанное максимальное значение.

Пусть  $\{Y_i^l\}_{i=1}^L$  марковская цепь с дискретным временем для прямой потоковой передачи, где  $Y_i^l$  – состояние модели в  $i$ -том раунде, которое представляется кортежем  $(X_i, N_i)$ , где  $X_i$  и  $N_i$  – состояние модуля ТСП источника (сервера) и количество ранних сегментов в  $i$ -том раунде соответственно. Процесс изменения  $N_i$  представляется следующим образом:

$$N_{i+1} = \min(N_{\max}, N_i + S_i - \mu RTT), \quad (3)$$

где  $S_i$  – количество сегментов, успешно переданных модулем ТСП отправителя в  $i$ -том раунде. Для удовлетворения условия  $N_i \leq N_{\max}$  при  $i = 1, 2, \dots, L$  модуль ТСП источника не отправляет сегменты в  $(i + 1)$ -ом раунде, если  $N_i = N_{\max}$ .

Предполагается, что длина видео значительно больше, чем  $RTT$ . Таким образом, доля запоздавших сегментов может быть аппроксимирована вероятностью в устойчивом состоянии:

$$f = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^L M[N_i^l]}{\mu RTTL} = \lim_{i \rightarrow \infty} \frac{M[N_i^l]}{\mu RTT}. \quad (4)$$

#### 4. Модель потоковой передачи с запоминанием

В модели с потоковой передачей данных с запоминанием количество сегментов в буфере может превышать значение  $N_{\max}$ . Более того, когда средняя производительность ТСП выше битовой скорости передачи видео, количество ранних сегментов увеличивается, и доля запоздавших сегментов в установившемся режиме равняется нулю.

Пусть  $\{Y_i^s\}_{i=1}^L$  марковская цепь с дискретным временем для потоковой передачи с запоминанием, где  $Y_i^s$  – состояние модели в  $i$ -том раунде, и  $Y_i^s = X_i$ . Количество ранних сегментов  $N_i$  исключено из пространства состояний для сокращения его размерности и уменьшения сложности расчетов. Однако вводится импульсное воздействие  $\rho_{yy'}$ , вследствие которого происходит переход из состояния  $Y_i^s = y$  в состояние  $Y_{i+1}^s = y'$ , соответствующее разнице между полученными и воспроизведенными сегментами во время этого перехода. Накопление этого воздействия к  $i$ -му раунду равняется  $N_i'$ .

Т.к.  $N_i'$  – общее количество ранних сегментов в  $i$ -ом раунде, когда передача и воспроизведение сегментов начинаются в нулевой момент времени, а  $N_i$  – количество ранних сегментов в  $i$ -ом раунде, когда воспроизведение начинается в момент времени  $\tau$ , имеется следующее соотношение между  $N_i$  и  $N_i'$ :

$$N_i = N_i' + \mu\tau. \quad (5)$$

Это отношение позволяет определить распределение в переходном режиме от  $N'_i$  к  $N_i$ , с помощью которого затем определяются доля задержанных сегментов [4].

## 5. Экспериментальные исследования с использованием модели прямой потоковой передачи

Применим рассмотренный ранее метод определения доли запоздавших сегментов как метрики производительности прямой потоковой передачи для параметров реальных TCP-соединений сети Интернет. В качестве тестовых соединений использовались соединения с серверами YouTube (<http://www.youtube.com/>), также использовался анализатор сетевого трафика Wireshark [8] и утилита tcptrace [9] для получения временных параметров и характеристики производительности соединений TCP.

Среди проанализированных соединений были выбраны пять из них для наглядного анализа производительности прямой потоковой передачи по TCP. В табл. 2 представлены характеристики соединений и рассчитанная доля запоздавших сегментов.

Таблица 2 Временные параметры и характеристика производительности соединений TCP при прямой потоковой передаче видео

№ п/п	$\tau$ , с	$\mu$ , сегм./с	$RTT_{CP}$ , с	$L$ , раундов	Тройное $ACK$	$f$
1	1	67,359	0,199	1420	7	0,00037
2	1	90,067	0,204	2292	13	0,00031
3	3	78,751	0,195	1692	19	0,00073
4	2	109,441	0,197	3016	13	0,00019
5	1	72,828	0,195	1975	10	0,00036

Анализ временных характеристик, а также субъективная оценка качества видео показали, что в основном начальная задержка при воспроизведении видео не превышает 5 с, а в среднем равняется 1 с и менее. В качестве показателя потерь использовалось количество быстрых повторных передач (получение тройного подтверждения  $ACK$ ), которые потенциально являются причиной запаздывания сегментов.

На основе полученных характеристик рассчитана доля запоздавших сегментов согласно формуле (1), которая в среднем составила  $3 \cdot 10^{-4}$  (рис. 2). Однако согласно субъективной оценке качества видео, запоздавшие сегменты не спровоцировали сбоя при воспроизведении видео (видео проигрывалось непрерывно). На рис. 3 приведены графики производительности тестируемых соединений TCP.

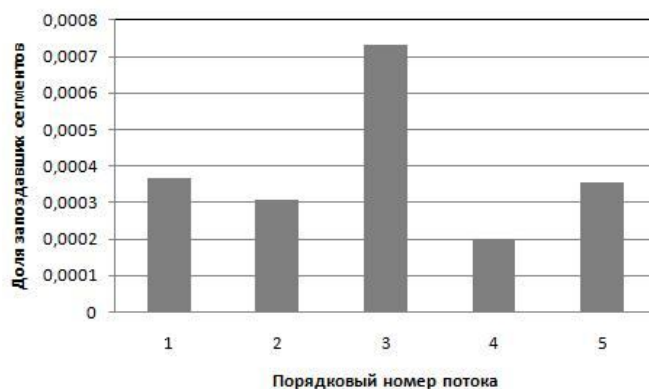


Рис. 2 Доля запоздавших сегментов тестируемых соединений TCP при прямой потоковой передаче видео

## 6. Выводы

В представленной статье были проанализированы современные тенденции использования транспортного протокола ТСР для передачи трафика мультимедиа в объединенных сетях, а также исследование производительности потоковой передачи данных посредством протокола ТСР. Проведенные исследования, в частности экспериментальные, подтверждают, что потоковая передача данных по ТСР действительно предоставляет приемлемую производительность. К тому же, если производительность соединения ТСР по крайней мере вдвое больше битовой скорости медиа, начальная задержка при воспроизведении видео равна единицам секунд, что также показывают исследования [4] и [7].

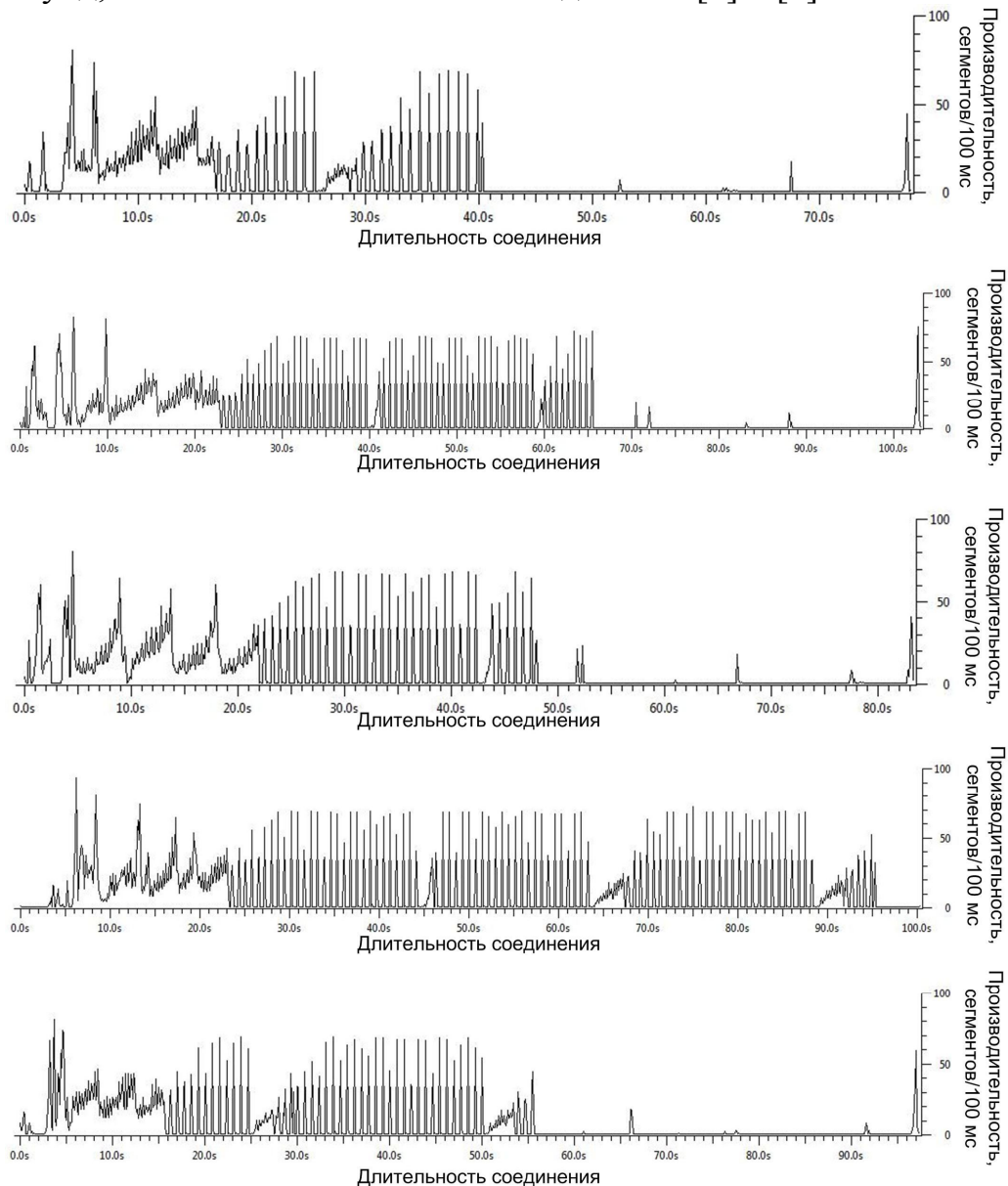


Рис. 3 Производительность соединений ТСР при прямой потоковой передаче видео контента

Для экспериментальных исследований была использована прямая потоковая передача по ТСР и соответствующая модель. К ограничениям модели можно отнести следующее:

1. Необходимость разработки модели с переменным значением  $\mu$ . Это связано с тем, что при постоянной битовой скорости качество передаваемого контента при его воспроизведении может меняться, тогда как постоянное качество достижимо только при переменной битовой скорости.

2. Доля запоздавших сегментов является достаточно грубой метрикой производительности потоковой передачи данных и не представляет собой адекватную оценку качества отображения, в то время как человеческое восприятие может допускать редкие незначительные искажения при воспроизведении видео.

Таким образом, в дальнейшем необходимы разработки аналитических моделей, учитывающих требования к качеству воспроизведения, имитационное моделирование, а также проведение экспериментальных исследований, включающих не только исследование характеристик соединений TCP, но и анализа субъективной оценки воспроизводимого мультимедиа.

Перспективными в данном направлении являются исследования вопросов буферизации (выбор оптимального размера буфера) при прямой потоковой передаче посредством TCP, а также многопутевая прямая потоковая передача.

**Список литературы:** 1. *Столлингс, В.* Современные компьютерные сети. 2-е изд. [Текст] / В. Столлингс. – СПб.: Питер, 2003. – 783 с.: ил. 2. ITU-T Y.2007 ITU-T Recommendation Y.2007 (2010), Next Generation Networks – Frameworks and functional architecture models, 2010, 37 p. 3. RFC 4614 Duke M., Braden R., Eddy W., Blanton E. A Roadmap for Transmission Control Protocol (TCP) Specification Documents, 2006. – 33 p. 4. Wang, B., Kurose, J., Shenoy, P., Towsley, D. Multimedia Streaming via TCP: An Analytic Performance Study [Text] / ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications and Applications. – 2008. – Vol. 4, № 2. – pp. 16:1–22. 5. Chung, J., Claypool, M., Zhu, Y. Measurement of Congestion Responsiveness of RealPlayer Streaming Video Over UDP [Электронный ресурс] / Proceedings of the Packet Video Workshop (PV). Nantes, France. – 2003. – Режим доступа: \www/ URL 6. <http://web.cs.wpi.edu/~claypool/papers/h2h/h2h.pdf> – 04.08.2011 г. – Загл. с экрана. 7. Padhye, J., Firoiu, V., Towsley, D., Kurose J., Modeling TCP Throughput: A Simple Model and its Empirical Validation [Text] / Proc. ACM SIGCOMM Computer Communication Review. – 1998. – Vol.28, №.4. – pp. 303–314. 8. Yan, J., Muhlbauer, W., Plattner, B. An Analytical Model for Streaming over TCP [Text] / NEW2AN 2011: 11th International Conference on Next Generation Wired/Wireless Advanced Networking. – 2011. – pp. 12. 9. Анализатор сетевых протоколов Wireshark [Электронный ресурс]. – Режим доступа: \www/ URL: <http://www.wireshark.org/> – 04.08.2011 г. – Загл. с экрана. 10. Анализатор файлов TCP [Электронный ресурс]. – Режим доступа: \www/ URL: <http://www.tcptrace.org/> – 04.08.2011 г. – Загл. с экрана.

*Поступила в редколлегию 25.07.2011*

**УДК 005.8:575.85**

**П.А.ТЕСЛЕНКО**, канд. техн. наук, доц., Одесская государственная академия строительства и архитектуры, Одесса

## **ВВЕДЕНИЕ В ЭВОЛЮЦИОННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЕКТАМИ**

Проект представлен в терминах эволюционного управления. Показано применение методов эволюционного развития сложных систем в предметной области управления проектами.

Ключевые слова: эволюционное управление проектами, зона толерантности, проектный биотоп